Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 30 (1939)

Heft: 15

Artikel: Die Kupferverluste bei Mutator-Transformatoren

Autor: Nolen, H.G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060840

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Kupferverluste bei Mutator-Transformatoren.

Von *H. G. Nolen*, Delft (Holland).

621.314.21 : 621.314.65

Bei Mutatortransformatoren können die Kupferverluste, die bei Mutatorbetrieb auftreten, nicht genau in einer Kurzschlussmessung erfasst werden. Es kommen bei Schaltungen mit mehreren sekundären Wicklungen zwei verschiedene Anordnungen des Kurzschlussversuches in Betracht. J. Kübler hat im Bull. SEV 1938, Nr. 11, die schweizerische Methode der amerikanischen gegenübergestellt und gibt der Meinung Ausdruck, dass bei der amerikanischen gewisse zusätzliche Verluste gemessen werden, von Quer-Streufeldern verursacht, die beim Mutatorbetrieb nicht auftreten.

Der Verfasser ist jedoch der Meinung, dass diese Verluste bei Mutatorbetrieb sogar noch grösser werden als bei dem amerikanischen Kurzschlussversuch und dass also die schweizerische Methode, welche diese Verluste ganz ausser Betracht lässt, sicherlich zu niedrige Werte der Kupferverluste gibt.

Les pertes dans le cuivre des transformateurs en service avec mutateurs ne peuvent pas être déterminées exactement par une mesure en court-circuit. Pour les couplages à plusieurs enroulements secondaires, deux dispositions de l'essai en court-circuit entrent en considération. M. J. Kübler a confronté, dans le Bull. ASE 1938, No. 11, la méthode suisse et la méthode américaine; il est d'avis qu'avec la méthode américaine on mesure des pertes additionnelles provoquées par des champs transversaux, pertes qui ne se produisent pas en service avec mutateurs.

L'auteur est cependant d'avis qu'en service avec mutateurs ces pertes sont même supérieures à celles mesurées par la méthode américaine de court-circuit et que la méthode suisse, qui néglige complètement ces pertes, donne des pertes dans le cuivre trop faibles.

Im Bulletin SEV 1938, Nr. 11, bespricht *J. Kübler* in seiner Arbeit «*Ueber die Messung der Einzelverluste bei Mutator-Transformatoren*» die verschiedenen Methoden der Messung der Kupferverluste dieser Transformatoren.

Hauptsächlich handelt es sich wohl darum, einen Entschluss zu fassen, ob es besser wäre, nach dem Vorschlag von *E. V. De Blieux* (USA) eine Kurzschlussmessung vorzunehmen, bei der ein Teil der sekundären Wicklung kurzgeschlossen wird, oder aber nach der *schweizerischen* Methode die ganze sekundäre Wicklung kurzzuschliessen und den gemessenen Verlustwert um einen aus dem Gleichstromwiderstand nach gewissen Formeln berechneten Betrag zu erhöhen.

Man ist sich wohl darüber einig, dass beide Methoden den richtigen Wert angeben würden [1]), wenn es keine zusätzlichen Kupferverluste gäbe, nur würde der Verlust etwas zu hoch gemessen werden, wenn man von dem Effektiv-Wert des Stromes ausgehen würde, der bei einer Kommutierungszeit Null auftritt. In dieser Hinsicht sind jedoch beide Methoden gleich; man kann auch einen etwas kleineren Strom annehmen, jedenfalls kann man diesen Fehler bei einem Vergleich der Methoden ausser Betracht lassen.

J. Kübler behauptet jedoch, der amerikanischen Methode — die auch anderswo vielfach verwendet wird — hafte der Fehler an, dass bei dieser nicht völlig symmetrischen Verteilung der beiden sekundären Wicklungsteile einer Säule in Bezug auf die Hochspannungswicklung grosse zusätzliche Verluste auftreten könnten, weil nur einer der beiden den Strom führe, während diese Verluste bei Mutatorbetrieb nicht auftreten würden.

Es handelt sich hier nicht um die zusätzlichen Verluste im Kupfer, die von den normalen Streufeldern hervorgerufen werden, sondern um diejenigen, die von abnormalen, durch die Unsymmetrie bedingten Streuflüssen herrühren.

Nun bin ich völlig damit einverstanden, dass derartige Verluste sehr wichtig sein können, obwohl sie bei einer richtigen Wicklungsanordnung unterhalb ziemlich kleiner Werte gehalten werden können; ich bin jedoch der Meinung, dass *derartige Verluste bei Mutatorbetrieb eher grösser als kleiner sein werden, als bei der Kurzschlussmessung nach De Blieux.*

Meiner Meinung nach würden also bei der Messung nach De Blieux — abgesehen von dem eben genannten Plusfehler infolge des zu grossen Stromes — die Verluste eher zu niedrig als zu hoch gemessen werden, bei der von Kübler bevorzugten Messung jedoch jedenfalls zu niedrig, weil bei dieser derartige zusätzliche Verluste ganz ausser Betracht bleiben.

Es soll jetzt diese Meinung begründet werden.

Im allgemeinen kann man näherungsweise den Streufluss eines Transformators in zwei Teile zerlegen.

Der eine ist derjenige Teil, der von einer ganz regelmässigen, unendlich langen Wicklung hervorgerufen werden würde, bei der also pro cm die primären und sekundären Ampèrewirkungen einander überall und fortwährend genau entgegengesetzt gleich sind. Bei einer Zylinderwicklung würden die Flusslinien einer solchen Anordnung alle parallel zur Säule laufen und also das Kupfer der Wicklung nur in dieser Richtung durchschneiden. Bei einer Wicklung endlicher Länge würden die Linien an den Enden etwas abbeugen; die Erscheinung ist jedoch nicht sehr wichtig und wird daher ausser Betracht gelassen. Ueber die von diesem Streufluss hervorgerufenen zusätzlichen Verluste wird hier nicht die Rede sein, denn diese werden bei Mutatorbetrieb durch die Oberwellen im Strom höher sein als beim 50-Hertz-Kurzschlussversuch. Dieser Minusfehler der 50-Hertz-Messung wird jedoch mehr oder weniger von dem schon erwähnten Plusfehler ausgeglichen, der davon herrührt, dass der effektive Strom bei Mutatorbetrieb der endlichen Kummutierungszeit wegen etwas kleiner wird. Es besteht hier jedoch keine Meinungsdifferenz.

Der zweite Teil des Streuflusses wird auftreten, wenn nicht überall die Ampèrewindungen pro cm primär und sekundär einander entgegengesetzt gleich sind. Man kennt derartige Zusatzfelder z. B.

[1]) Wir lassen hier die Schwierigkeiten ausser Betracht, über die *Waldvogel* im Bull. SEV 1938, S. 646, berichtete.

bei Transformatoren, bei denen ein Teil der Wicklung abgeschaltet ist (Anzapfungen). Die entsprechenden Flusslinien verlaufen der Hauptsache nach quer zur Richtung des normalen Streufeldes, durchsetzen also das Kupfer in der anderen Richtung als die normalen Streulinien und können in den Windungen erhebliche zusätzlichen Verluste hervorrufen. Diese Querfelder der Zylinderwicklung stimmen also mehr oder weniger mit den normalen Streufeldern einer Scheibenwicklung überein, sie werden um so kleiner, je stärker die totale Unsymmetrie über die Kernhöhe verteilt ist. Bei Hochspannungswicklungen wird z. B. immer schon von den Zwischenräumen der Spulen eine derartige Unregelmässigkeit herbeigeführt; die zusätzlichen Felder weisen dann jedoch den Charakter einer sehr vielfältig unterteilten Scheibenwicklung mit kleinen Spulendistanzen auf und bleiben daher klein. Bei einem sechsphasigen Mutatortransformator sind meistens die beiden sekundären Teile in Spulen aufgeteilt, die abwechselnd auf der Säule angebracht sind. Wenn nun nur eine Hälfte den Strom führt, wie bei der Messung nach De Blieux, so tritt eine Abwechslung auf von Spulen, die den Strom führen und von stromlosen Spulen, während die totalen primären und sekundären Ampèrewindungen der ganzen Säule einander entgegengesetzt gleich sind. Es werden also auch hier zusätzliche Querfelder auftreten, die noch dadurch erhöht werden, dass dieselben nicht mit den normalen Streufeldern einer Scheibenwicklung mit geteilten Endspulen übereinstimmen, sondern mit denen einer Scheibenwicklung, die nur ganze Spulen enthält. *J. Kübler* hat also ganz recht, dass auf diese Weise zusätzliche Verluste auftreten können. Diese sind der Rechnung schwer zugänglich. Er meint nun, diese Verluste werden bei Mutatorbetrieb nicht, oder wenigstens gar nicht in demselben Masse bestehen und die amerikanische Messmethode sei daher ungeeignet.

Diese Behauptung wird damit begründet (p. 276 oben), dass bei Mutatorbetrieb «die Grundwelle in beiden Zweigen gleichzeitig fliesst». Auch das ist wahr; dasselbe gilt ausserdem für alle ungeraden Oberwellen des Stromes. *Es bleibt jedoch die Tatsache bestehen, dass in Wirklichkeit der Totalstrom sekundär nur abwechselnd in beiden Zweigen fliesst*, oder vielmehr, dass abwechselnd aufeinander folgen:

Strom in der einen Hälfte
beide Hälften stromlos
Strom in der anderen Hälfte
beide Hälften stromlos.

Bei Mutatorbetrieb wechselt also der Streufluss immer zwischen einem Nullwert und einer unsymmetrischen Lage, so dass also in Wirklichkeit niemals der Streufluss besteht, der zu einer in beiden Hälften Strom führenden Wicklung gehören würde! Diese Erkenntnis sollte uns vermuten lassen, dass dieser abnormale Fluss immerhin bei seinem Entstehen und Verschwinden Spannungen im Querschnitt der von ihm durchfluteten Drähte induzieren muss, die ähnliche zusätzlichen Verluste herbeiführen, wie die, welche bei Stromführung einer Hälfte auftreten würden.

Es scheint hier ein gewisser Widerspruch zu existieren zwischen den von *Kübler* an Hand der harmonischen Zerlegung des Stromes erreichten Resultate und der Aussage dieser einfachen Ueberlegung.

Die Erklärung ist darin zu suchen, dass bei der harmonischen Analyse des Totalstromes nur deshalb in beiden Wicklungsteilen gleichzeitig fliessende und gleichsinnige Ströme ungerader Ordnung gefunden werden, weil für jede der Hälften die gesamten geraden Harmonischen, zusammen mit der Gleichstromkomponente, während einer der Halbperioden genau die ungeraden Harmonischen aufheben. Es ist jedoch einleuchtend, dass es bei solcher Sachlage nicht angängig ist, nur die ungeraden zu betrachten, für welche diese zusätzlichen Verluste verschwinden, denn obgleich der Gleichstrom keine derartigen Verluste gibt, müssen die geraden Harmonischen doch gewiss auch eine sehr bedeutende Rolle spielen! Man muss also den Einfluss dieser Harmonischen auf die abnormalen Verluste untersuchen.

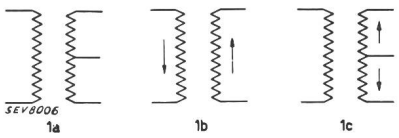

Fig. 1.

Man kann diese Frage am besten erörtern, indem man eine ganz einfache Spulenanordnung annimmt, die in Fig. 1 a gezeichnet ist. Zwar wird niemand die Wicklung so gestalten; die beiden sekundären Wicklungen würden tatsächlich vielfach unterteilt werden. Das ändert jedoch die Sachlage nur zahlenmässig, prinzipiell bleibt der Unsymmetriefall derselbe.

Nur die ungeraden Harmonischen werden in die primäre Wicklung transformiert, die Harmonischen gleicher, ungerader Ordnung der beiden sekundären Hälften sind einander der Grösse und Phase nach gleich; es wird also der doppelte Wert in die primäre Wicklung übertragen. Gleichstromkomponenten können störend sein; sie werden jedoch jedenfalls nicht transformiert. Die geraden Komponenten des sekundären Stromes induzieren in entgegengesetzter Richtung und heben sich also für die primäre Wicklung auf. Es kann, was die Wechselflüsse anbetrifft, Fig. 1 a zerlegt werden in 1 b und 1 c.

Es ist einleuchtend, dass die vom Stromsystem 1 c hervorgerufenen Streuflüsse völlig Querflüsse sind und die zu solchen Flüssen gehörenden zusätzlichen Verluste hervorrufen werden.

Bei der Messung nach Kübler werden gewiss diese Verluste ganz ausser Betracht gelassen. Es könnte jedoch sein, dass bei der 50-Hertz-Kurzschlussmessung nach *De Blieux* die zusätzlichen Verluste durch Querfelder grösser wären als die jetzt erörterten, bei Mutatorbetrieb auftretenden. Das soll jetzt untersucht werden.

Ich möchte die Berechnung zuerst für eine wirkliche Sechsphasenschaltung durchführen. Der Anodenstrom sei rechteckig angenommen, eine Voraussetzung, die auch den besprochenen Messmethoden zu Grunde liegt. Bei dieser Schaltung kommen sekundär alle ungeraden und geraden Harmonischen des Stromes vor, ausser den sechsfachen. Nun ist das Quadrat des Effektivwertes des Totalstromes der Summe der Quadrate aller harmonischen nebst des Gleichstromes gleich. Man kann beweisen [2]), dass zum Quadrat des Gesamtwertes $\frac{1}{6} I_g^2$ (I_g = totaler Gleichstrom) die geraden Harmonischen einen Beitrag $\frac{1}{18} I_g^2$ liefern. Würde also der zusätzliche Verlust nicht von der Frequenz abhängig sein, so würden die von den geraden Harmonischen durch Querfelder hervorgerufenen zusätzlichen Verluste, die dem Quadrat der erregenden Ströme proportional sind, $^1/_{18}$ sein des Verlustes, der bei einem 50-Hertz-Wechselstrom mit Effektivwert I_g auftreten würde. In Wirklichkeit wird jedoch der zusätzliche Verlust bei höheren Frequenzen erheblich zunehmen! Der Frequenzfaktor, mit dem man den Verlust bei 50 Hertz multiplizieren muss, würde bei der doppelten Frequenz schon etwa 4 sein, bei höheren Frequenzen noch grösser, obwohl nicht mit dem Quadrat der Ordnungszahl zunehmend. Wenn man also annimmt, dass dieser Faktor für alle geraden Harmonischen 4 sei, so schätzt man noch zu niedrig. Mit dieser Zahl gerechnet, wird der zusätzliche Verlust also $^4/_{18}$ oder $^2/_9$ desjenigen bei einem Strom mit Effektivwert I_g und Frequenz 50/s.

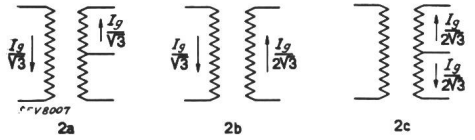

Fig. 2.

Bei der Messung nach De Blieux ist der Sekundärstrom in einer Hälfte $\frac{I_g}{\sqrt{3}}$. Man kann jetzt das Totalbild 2 a (Uebersetzungsverhältnis 1 angenommen) auflösen in den symmetrischen Anteil 2 b und den unsymmetrischen Teil 2 c. Die zusätzlichen Verluste durch Querfelder werden also jetzt dem Quadrat $\left(\frac{I_g}{2\sqrt{3}}\right)^2$ oder $\frac{1}{12} I_g^2$ entsprechen.

[2]) Ich hoffe an anderer Stelle bald eine allgemeine Mitteilung über die Anteile der Harmonischen in der Quadratreihe zu veröffentlichen.

Man misst also nur $^3/_8$ dieser Verluste, die bei Mutatorbetrieb $^2/_9 I_g^2$ entsprachen.

Hätte man, der Unsicherheit der Verluste bei den viel höheren Frequenzen wegen, nur mit der zweiten Harmonischen gerechnet, so würde man ein Verhältnis von $^5/_9$ gefunden haben, was also sicherlich zu hoch ist.

Man wird also zweifellos zum Ergebnis kommen, *dass die zusätzlichen Verluste durch Querfelder bei der Messung nach De Blieux anstatt höher, jedenfalls kleiner als bei Mutatorbetrieb sind,* wenigstens bei dieser Schaltung.

Bei einer Doppel-Dreiphasenschaltung (mit Saugdrosselspule) ist der Anteil der Quadrate der geraden Harmonischen $\frac{1}{72} I_g^2$.

Bei Frequenzfaktor 4 ist also der zusätzliche Verlust, Querfeldern gerader Harmonischer zufolge, $^1/_{18}$ der Verluste bei einem 50-Hertz-Strom mit Effektivwert I_g. Bei der Kurzschlussmessung nach De Blieux ist der sekundäre Strom in einer Hälfte $\frac{I_g}{\sqrt{6}}$, der unsymmetrische Teil also $\frac{I_g}{2\sqrt{6}}$, und die zusätzlichen Verluste entsprechen einem Quadratwert $\frac{1}{24} I_g^2$. Sie sind also höchstens $\frac{18}{24}$ oder $^3/_4$ der Verluste, die man wirklich hatte messen müssen. Hätte man hier nur der zweiten Harmonischen Rechnung getragen und zwar mit Frequenzfaktor 4, so würde man das Verhältnis $\frac{10}{9}$ gefunden haben, das allerdings bestimmt zu gross sein muss.

Auch bei Doppel-Dreiphasenschaltung ist also der nach der De Blieux-Methode bestimmte Verlustwert in bezug auf die abnormalen Verluste durch Querfelder keinesfalls zu gross.

Bei Gabelschaltung könnte man etwas ähnliches beweisen.

Ich glaube jedoch mit den zwei Beispielen schon den Beweis gebracht zu haben, dass der Fehler, den *Kübler* der Messung nach De Blieux zuspricht, nicht nur nicht besteht, sondern dass die zusätzlichen Verluste, von Querfeldern herbeigeführt, eher noch zu günstig beurteilt werden, dass jedoch bei der schweizerischen Methode ein viel grösserer Fehler gemacht wird, indem dabei angenommen wird, dass die zusätzlichen Verluste durch Querfelder bei Mutatorbetrieb auch bei weniger geeigneten Wicklungsanordnungen nicht in erheblichem Masse bestehen würden. Das erste Verfahren hat eben den Vorteil, dass dabei die höheren Verluste wenigstens bei dem Kurzschlussversuch entdeckt werden. Ausserdem ist es einfacher, denn es braucht weniger rechnerische Ueberlegungen.